

## 論文審査の要旨及び担当者

No.1

報告番号	甲 乙 第	号	氏 名	堀場 勝広
論文審査担当者	主 査	政策・メディア研究科委員長兼環境情報学部教授		村井 純
	副 査	政策・メディア研究科委員兼環境情報学部教授		中村 修
	副 査	政策・メディア研究科委員兼環境情報学部教授		楠本 博之
	副 査	東京大学情報基盤センターネットワーク部門准教授		関谷勇司
学力確認担当者：				
(論文審査の要旨)				
堀場 勝広君提出の学位請求論文は「コンテナ型 NFV アーキテクチャ」と題し、6 章からなる。				
<p>本論文では、本来は専用のハードウェアで実装されてきたネットワーク装置を、汎用的なハードウェアとソフトウェアによって仮想化されたネットワーク機能(VNF)に分離する技術体系である Network Function Virtualization(NFV)において、仮想マシン(VM)を利用した NFV の従来の実装では困難だった可搬性とパケット処理性能を両立するコンテナ型 NFV アーキテクチャを提示した。本論文は、インターネットにおけるアプリケーションの進化に伴う通信品質に向けた要求の多様化と高度化に対して、その要求に最適化されたネットワークを動的に提供するネットワークスライシングの概念の実現を目的とし、ネットワークサービスの Platform as a Service(PaaS)化を提唱している。本論文では、ネットワークサービスの PaaS 化を実現する要素技術として NFV を捉え、その要件として VNF の「可搬性」を新たに定義した。その上で、関連研究の調査だけでなく、産学連携の体制を SFC コンソーシアムとして作り、そこで必要な専門家の参加によって、実践的な検証と評価を実施した。その結果、既存の NFV は VNF の「可搬性」とパケット処理性能の両立に課題があることを明らかにした。そして、この課題を解決するコンテナ型 NFV アーキテクチャを提案し、その有効性を実証した。</p>				
<p>第 1 章では、本来 NFV が解決を試みた現代の通信事業における課題について言及している。さらに、将来のインターネットにおけるアプリケーションの進化について言及し、ネットワークに対する通信品質の要求の多様化に対して、最適化されたネットワークを動的に提供することの必要性について論じている。</p>				
<p>第 2 章では、第 5 世代の移動体通信システム(5G)で期待される自動運転のようなアプリケーションを例として、アプリケーションに応じたネットワークアーキテクチャを最適化することの必要性和、それを実現する概念であるネットワークスライシングについて言及している。また、ネットワークスライシングの実現するにあたって、NFV を含む様々な技術領域の組み合わせの必</p>				

要性を示し、しかしその実装方法は不明確である現状を整理している。この現状に対して、本論文では、クラウドコンピューティングにおけるアプリケーション開発のパラダイムをネットワークサービスに適用することを提案し、アプリケーションの要求に応じて動的にその構成要素を供給する Platform as a Service (PaaS) の概念をネットワークに適用したネットワークサービスの PaaS 化を提唱している。そして、ネットワークサービスの PaaS 化を実現するため要素技術の組み合わせと要件を整理し、NFV において VNF の最適な配置を保証する「可搬性」を新たな要件として定義している。

第 3 章では、第 2 章で論じた既存の NFV の課題について、既存の標準化仕様と関連研究に基づいた分析をおこなっている。NFV に関する標準化仕様においては、最新の研究成果や NFV 関連製品の実装が、汎用的なハードウェアと VNF の分離という本来の NFV の目的とした標準仕様と乖離している点を指摘している。特に VM と汎用的なオペレーティングシステムにおけるネットワーク I/O の高速化に焦点を絞り、最適化による抽象化への影響や、市場のハードウェアとソフトウェアの傾向について考察されている。

第 4 章では、第 2 章と第 3 章で論じた既存の NFV における可搬性とパケット処理性能の両立に関する課題を、実践的な手法を用いて明らかにしている。具体的には、産学連携のコンソーシアムを組織し、多くのベンダで独自に実現されている多様な NFV 関連製品を共同的に検証・評価している。この評価方針は、通信事業者、装置ベンダ、部品メーカーを含むマルチステークホルダーによって定義され、実際のサービスに直結する関係者の理解を求める方法をとった。その結果、様々なベンダの VNF と、VNF の動作環境である NFV Infrastructure (NFVI) を組み合わせた相互接続性確認できた一方で、既存の仮想マシン (VM) を利用した NFV は、NFV Infrastructure (NFVI) に特化したパケット処理性能の最適化がされており、可搬性との両立に課題があることを明らかにしている。また、ネットワーク装置やサービスの展示会である Interop において、実際に商用ネットワークを構築・運用し、マルチベンダでの相互運用性とパケット処理性能が両立することを実証しながらも、可搬性との両立が困難なことを明らかにした。すなわち、既存の NFV は専用ハードウェアで作成されたネットワーク装置を仮想化したに過ぎず、ネットワークサービスの PaaS 化を実現するための可搬性に課題があることを明らかにしている。

第 5 章では、第 4 章で明らかにした課題を解決するため、コンテナ型 NFV アーキテクチャを提案している。コンテナ型 NFV アーキテクチャは、既存の仮想マシン (VM) を利用した NFV の課題である可搬性とパケット処理性能の両立を解決するため、VNF の最小構成単位を、VM からプロセスの集合体であるコンテナとして再定義している。

提案アーキテクチャは、仮想化されたネットワーク機能のネットワーク I/O を POSIX API で抽象化することで、VNF の可搬性を確保している。また、それに伴ってボトルネックとなる汎用的なオペレーティングシステムのカーネルが持つネットワークスタックをバイパスすることで、VNF のパケット処理性能を向上することを可能にしている。さらに、提案したコンテナ型 NFV アーキテクチャの有用性を実証するため、VNF のネットワーク I/O に Netmap を利用したプロセスとして実装した結果、要求される可搬性を担保した従来方式と比較して、VNF の種類に応じて約 2 から 5.5 倍のパケット処理性能を達成し、可搬性とパケット処理性能の両立を実証した。

結論では、ネットワークサービスの PaaS 化の必要性和、その実現に向けてコンテナ型 NFV アーキテクチャの貢献について論じている。また、本論文の成果が社会に与えた影響として、仮想化されたネットワーク機能が、コンテナとして実装されはじめている点について言及している。そして、ネットワークサービスの PaaS 化に向けて、Software Defined Networking (SDN) や、クラウド事業者と通信事業者を統合したオーケストレーションシステムの必要性など、今後の研究の方向性を示している。

著者は 2008 年からネットワークの仮想化に関する研究を開始し、その研究成果を基にしたネットワークの構築と運用を、学術ネットワークと商用ネットワークにおいて実践し、ネットワークスライシングという概念が実現されることによる意義を社会に提示し続けてきた。また、2014 年より次世代 NSP コンソーシアムを立ち上げ、ネットワークスライシングの実現に向けて、NFV や SDN を含む様々な技術の検証と評価を推進した。そして、5G の普及を目前にして注目されはじめたネットワークスライシングについて、いち早く具体的なシステムを社会に対して提示してきた。これらの成果は、著者が専門領域であるネットワークだけでなく、クラウドコンピューティングに立脚したアプリケーションの開発といった、広範囲の技術に精通していることによって実現されたものである。また、本研究の総合的な成果として、ネットワークアプリケーションの最適な資源割当をダイナミックに実現し、その運用コストと開発コストの効率化を実現化するために、高度化する情報社会の基盤の発展に大きく寄与することが期待できる。

上記の成果と、それを記述した本論文を通して、著者の研究者としての先端的な研究を行うために必要な高度な研究能力、並びにその基盤となる豊かな学識、研究を社会貢献へ結びつける能力を有することを示したものと見える。よって、本論文の著者は、博士（政策・メディア）の学位を受ける資格のあるものと認める。